

核反应堆管道 LBB 设计关键软件研发

李朋洲, 乔红威, 孙磊

中国核动力研究设计院, 成都, 610041

摘要: 破前漏 (LBB) 设计是三代核电技术的重要技术特征之一, 但国内直到现在也没有受认可的 LBB 设计专用程序, 开发出受认可的 LBB 设计程序具有重要意义。简单介绍 LBB 设计中断裂力学分析、裂纹张开位移分析以及泄漏率计算的技术背景以及我国相关关键程序的研发。算例验证结果表明, 自主开发的程序具有较高的精度, 进一步完善和验证后可以应用于实际工程。

关键词: LBB 设计; 软件研发; 断裂力学分析; 裂纹张开位移; 泄漏率计算

中图分类号: TL339 文献标志码: A

0 LBB 设计背景

在核反应堆管道破前漏 (LBB) 设计中, 最核心的问题是要利用各种计算手段证明灾难性的双端断裂事故可以排除, 从而保证反应堆设计的安全性和合理性。LBB 设计的主要计算手段是断裂力学和泄漏率分析技术。断裂力学分析包括临界裂纹长度计算、裂纹的稳定性分析、裂纹张开位移计算等, 属于力学问题。泄漏率的计算涉及到裂纹的几何形状、流过的路径长度、摩擦效应以及流体穿过裂纹的热动力学等方面, 与诸多不确定的条件有关, 是 LBB 分析中难度最大的工作。

断裂力学分析和泄漏率分析具有很强的专业性, 设计人员通常采用专用 LBB 分析程序对管道进行安全评定。国外开发了一系列经广泛认可的 LBB 设计专用分析程序, 而国内在 LBB 设计领域起步较晚, 目前尚无可信的自主研发程序用于实际工程, 相关设计严重依赖于国外公司, 阻碍了 LBB 技术在国内核电厂的应用。因此, 开发可被认可的 LBB 设计专用软件对于我国掌握核心技术、摆脱技术依赖、获得自主知识产权等方面都具有重要意义。

本课题以开发出具备自主知识产权的 LBB 设计专用分析程序为目的, 对 LBB 设计的断裂力学分析、裂纹张开位移计算以及泄漏率分析等方面的技术背景作了简单介绍, 并介绍相关程序的研发情况, 供相关工作参考。

1 LBB 设计断裂力学分析软件的研发

LBB 断裂力学分析主要用于验证含假想裂纹的管道对外部载荷的抵御能力, 在整个 LBB 分析流程中占有极其重要的地位。国际上利用试验数据和数值分析方法, 开发并验证了一些 LBB 设计的断裂力学分析程序, 包括 FLET、NRCPIPE、FRACTURE、PICEP。除了这些专用程序外, 非线性有限元法 (ANSYS、ABAQUS 等) 由于在解决复杂结构、复杂载荷情况下的断裂力学分析问题上具有显著优势, 因此也被应用于 LBB 设计。

在各种 LBB 断裂力学分析软件中, 所采用的主要分析方法是简化的工程化方法和精细的弹塑性断裂力学分析方法。简化的工程化方法包含净截面垮塌准则法、塑性极限载荷法、流变应力准则法。弹塑性断裂力学分析方法以 J 积分撕裂模量汇交方法 (简称 J-T 法)、R6 失效评定图法等为代表。

简化工程化方法的分析结果整体上倾向于保守, 通常被应用于第一层次的 LBB 设计。弹塑性断裂力学方法被认为是最可信、最精确的 LBB 断裂力学分析手段, 但是需要较多的材料信息作为输入参数, 整个计算过程较为繁琐, 通常被应用于详细的第二层次的 LBB 设计。为了兼顾第一层次和第二层次 LBB 设计断裂力学分析的需求, 在 LBB 断裂力学分析软件开发上应尽量包含简化方法和弹塑性断裂力学方法。

LBB断裂力学分析软件的开发综合考虑了同类型软件的研发情况以及相关学科的发展趋势,采用了部分成熟的工程化算法,并结合弹塑性断裂力学方法的优势,制定软件的整体框架。LBB断裂力学分析软件具有友好的人-机界面,整合了多种分析方法,充分考虑了不同的裂纹类型。与国际上同类型软件相比,在计算算法上具有明显优势,并且留有弹塑性断裂力学方法的接口,适用范围更为广泛。

2 裂纹张开位移计算程序开发

裂纹张开位移(COD)的大小直接影响泄漏率分析结果,COD越大,泄漏率越大,泄漏越容易被检测到。COD依赖于裂纹的几何形状、构件的几何尺寸、材料的性能以及载荷条件。计算方法囊括线弹性断裂力学法、弹塑性断裂力学法或有限元法等多种类型。根据研究结果,对于韧性强的核级管道,基于弹塑性断裂力学的计算方法和基于弹塑性有限元分析的数值方法具有较好的工程适用性。

专用的LBB分析软件,如美国核管会主导开发的SQUIRT、美国电力研究协会(EPRI)开发的PICEP、俄罗斯的FRACTURE等都具有COD计算功能,可以用来计算环向贯穿裂纹在简单拉伸、纯弯曲及拉伸弯曲复合加载下的裂纹张开位移。轴向裂纹的张开位移可依据NP-3596-SR, Rev.1提供的无量纲化的COD曲线图和其他方法进行计算。相比直管道,弯管的COD计算难度更大,其研究成果也很少。尽管核电厂管道的弯曲部位一般都不存在焊缝等薄弱环节,但由于弯管所受的弯矩载荷相对较大,因此弯管在管道的LBB分析中也受到了关注。

不论是线弹性方法还是弹塑性方法,在载荷较小时得到的结果都比较理想,载荷较大时都会出现一定程度的误差。直接利用弹塑性有限元进行COD计算能获得满意的结果,但缺点是工作量大,不利于工程化应用。为了开发出满足LBB工程设计需求的COD计算程序,在开发相关程序时需要满足以下几个基本要求: COD的计算方法应包含线弹性断裂力学算法和弹塑性断裂力学算法,方法种类应尽可能多,以便相互校核;除了能解决直管的轴向、环向裂纹计算问题外,还能解决弯管问题。根据上述要求开发了COD计算

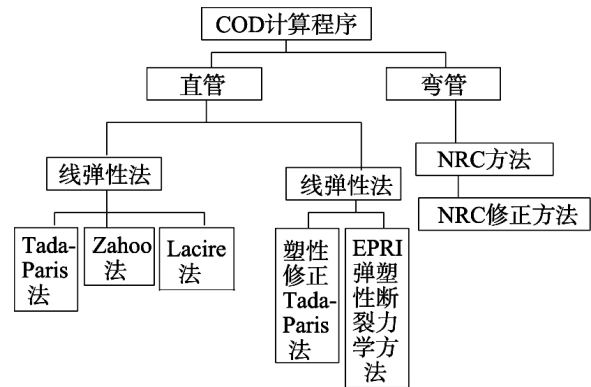


图1 COD计算程序框图

Fig. 1 Flow Chart of COD Calculation Program

程序,程序框图见图1。

3 管道贯穿裂纹流体泄漏率程序开发

泄漏率的计算用于确定假设贯穿裂纹在正常工况下高压流体的泄漏量,以此泄漏量作为泄漏监测系统设计的依据,泄漏率计算值过大或过小都会影响管道对LBB设计准则的适用性。由于泄漏率计算的复杂性及不确定性,国外一般都采用理论和实验研究相结合的方法进行泄漏率计算程序的开发。

对于核反应堆中的小破口失水问题,泄漏率的计算经常采用两相流理论,如均匀平衡模型、滑移模型、冻结流模型、不平衡模型、不平衡两流体模型等。目前国外广泛认可的泄漏率计算程序为SQUIRT和PICEP,其理论基础都是基于修正过的Henry两相临界流模型。Henry两相临界流模型在反应堆小破口事故中的泄漏率计算上具有很大的优势。

目前的研究重点主要集中在裂纹形貌参数对流体热工现象的影响方面。流道的形貌对泄漏量的预测有很大的影响;流道裂纹的主要形貌参数有:裂纹表面粗糙度、裂纹拐角数量、实际流道长度与厚度之比等。NUREG/CR-6004对裂纹形貌作了详细的阐述,NUREG/CR-6861也对裂纹形貌对泄漏量的影响作了定量分析,上述2个文件的发布对于提高泄漏率计算的精度具有重要意义。

在试验研究领域,国际上开展了一系列泄漏率试验研究工作及裂纹形貌研究工作。通过对试验件以及真实退役管道裂纹的解剖试验,获取了诸如局部粗糙度、全局粗糙度、裂纹真实长度、入口形貌等重要的输入参数。这些项目的开展大

表1 直管环向裂纹的临界裂纹长度计算验证
Table 1 Verification of Critical Circumferential Crack Length Calculation of Straight Pipe

自主开发软件算法	NP192	PLL	NSC	SRP
临界裂纹长度/m	0.9826	0.9726	0.9886	0.9729
FRACTURE算法	NRC	MM	PLL	MR125
临界裂纹长度/m	0.9826	0.6246	0.9669	0.9321

表2 J-T方法和两倍斜率法的验证
Table 2 Results of J-T and Twice Elastic Slope Methods

方法	FLET(R6方法)	J-T法	两倍弹性斜率法
极限载荷/N	2.687×10^4	2.615×10^4	2.271×10^4

表3 PICEP 算例 1
Table 3 First Test Example of PICEP

裂纹长度/m	COD/m (PICEP)	COD/m (本文)	泄漏率/L · min ⁻¹ (PICEP)	泄漏率/L · min ⁻¹ (本文)
0.04064	2.877×10^{-5}	2.824×10^{-5}	0.489	0.656
0.06096	8.303×10^{-5}	8.425×10^{-5}	3.181	3.303
0.07112	1.264×10^{-4}	1.292×10^{-4}	6.307	6.140
0.08128	1.814×10^{-4}	1.827×10^{-4}	11.02	10.539
0.09144	2.489×10^{-4}	2.502×10^{-4}	18.24	17.17
0.1016	3.302×10^{-4}	3.336×10^{-4}	28.12	27.091

表4 PICEP 算例 3
Table 4 Third Test Example of PICEP

裂纹长度/m	COD/m (PICEP)	COD/m (本文)	泄漏率/L · min ⁻¹ (PICEP)	泄漏率/L · min ⁻¹ (本文)
0.21336	6.35×10^{-5}	6.42×10^{-5}	4.124	4.446

大提高了泄漏率分析程序的计算精度。

借鉴国外经验，以修正过的两相临界流模型为基础，结合相关的泄漏率试验以及国际上的最新研究成果，开发出的泄漏率分析程序具有以下功能：

(1) 考虑了裂纹几何形貌对压降的影响。

(2) 软件引入了有效粗糙度、有效流道长度、有效拐角数目的概念，并对流道拐角压降进行了修正，能对各个参数的影响进行灵敏度分析。

(3) 可用于入口为过冷水、两相流和过热蒸汽情况下泄漏率的计算，并考虑了出口已达到临界流和未达到临界流的情况。

4 程序算例验证

4.1 裂纹稳定性分析软件验证

裂纹稳定性分析软件的部分工程算法验证参考了FRACTURE软件，弹塑性断裂力学方法验证参考FLET算例^[1]。

表1是自主开发程序与FRACTURE的对比验证结果。从表1可以看出，对于直管环向裂纹，自主开发程序取得的计算结果与FRACTURE非常接近。另外，利用FLET的算例验证了J-T算法和两倍弹性斜率算法。从表2可以看出，其计算结果与R6方法相比更保守，尤其是两倍弹性斜率法。

4.2 COD计算程序和泄漏率计算程序验证

COD和泄漏率计算程序的验证采用PICEP程序的算例。在算例中，除全局粗糙度取自NRC推荐数值外，其余载荷及裂纹形貌信息均严格取自PICEP算例。

表3、表4给出PICEP的算例与自主开发程序的计算结果。可以看出，自主开发程序的计算精度与PICEP非常接近，但自主开发程序在COD较小时得到的泄漏率偏大，而在COD较大时，泄漏率结果偏于保守。除了PICEP程序的算例验证外，其他试验数据以及公开发表的文献数据亦用于程序的验证，限于篇幅所限，在此不一一赘述。

5 总 结

由于我国一直缺乏核安全监管机构所认可的 LBB 专用分析程序,程序的缺乏已经成为制约我国 LBB 设计技术发展的瓶颈,因此相关工作的开展变得非常迫切。在国家相关项目的资助下开展了 LBB 设计专用程序开发工作,目前已初步完成

了裂纹稳定性分析软件、COD 计算程序和泄漏率程序的开发,并取得了不错的效果。下一步工作将利用更多的试验数据和数值算例对程序作进一步完善和验证,并使软件具备工程应用水平。

参考文献:

[1] EPRI. FLET: Pipe Crack Instability Program. NP 6717-CC-ML, RP 1757-73[R]. 1990.

Key Code R&D of LBB Design for Pipeline in Reactors

Li Pengzhou, Qiao Hongwei, Sun Lei

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

Abstract: The Leak Before Break (LBB) concept, as an important feature of the third generation nuclear power technology, is widely used in the high-energy piping design in nuclear industry. However, for some historical reasons, the application of LBB concept in China lagged behind compared with that in the developed countries. Up to now, there are no credible codes developed by China which can be applied to an actual project, and the relevant design mainly relies on foreign companies. Hence, the development of an approved LBB design code has great theoretical and practical importance for China. In this paper, the background of the fracture mechanics analysis, Crack Opening Displacement (COD) calculation and leak rate calculation in LBB design are briefly introduced firstly, and then the R&D situation of the key code in NPIC is also presented, and some examples from the approved codes and published papers are used to verify the self-developed code. The calculation results show that the accuracy of the code is in well consistence with the examples. This code can be used in the practical engineering after refinement and validation.

Key words: LBB design, Code development, Fracture mechanics analysis, Crack opening displacement, Leak rate calculation

作者简介:

李朋洲(1967—),男,研究员。1998年毕业于中国核动力研究设计院反应堆结构力学专业,获博士学位。现主要从事反应堆结构力学研究。

乔红威(1981—),男,副研究员。2009年毕业于西北工业大学飞行器设计专业,获博士学位。现主要从事反应堆结构力学研究。

孙磊(1968—),男,研究员,博士。现主要从事反应堆结构力学研究。

(责任编辑:杨洁蕾)